

深部金属矿综合地球物理响应与综合预测方法

——以金川超大型铜镍硫化物矿床为例

曾昭发,周宁远,张建民*,霍芷君,宫明旭

(吉林大学地球探测科学与技术学院)

摘要: 深部金属矿探测是目前资源勘查的重要方向,地球物理方法探测深度大、分辨率高,是深部金属矿探测最有效手段之一。以金川铜镍硫化物矿床为背景,在综合分析地质背景、岩石物理性质的基础上,对航磁数据进行了多尺度分离,确定了在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ矿区西南侧深部具有良好的找矿远景。综合利用航磁、重力、CSAMT剖面测量数据的反演结果,分析各方法异常特征,结合已知典型岩矿体分布,揭示了构造带附近的中低电阻率、高密度、高磁异常区为有利的找矿位置。根据该特征确定了深部找矿靶区,推测找矿靶区深度超过1 000 m,为钻探提供了重要依据。

关键词: 金川铜镍硫化物矿床;深部找矿;地球物理;CSAMT;重磁;联合反演

中图分类号:TD15 P631 P618.51

文章编号:1001-1277(2020)09-0022-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20200904

引言

随着国家经济的持续增长,中国铜、镍等金属矿产供需矛盾日益突出,开展深部找矿,提高资源保有量,是最可行的缓解手段。深部找矿方法中地球物理勘探深度较大、分辨率高、类型多样,对目标区域可进行多尺度探测,可以为深部找矿提供丰富的信息。国内外通过不同的地球物理勘探方法取得了显著的成果。T. G. Hildenbrand等^[1]提出,重磁数据的再处理与分析,能够确定区域地壳断裂或断层,为分析侵入岩和大型金属矿床的侵位提供了条件。Hassan Kheyrollahi等^[2]利用延拓处理和信息增强技术,发现并预测了第三系岩浆岩中斑岩型铜矿床分布规律。Fan Xiao等^[3]利用布格重力和航磁数据,对中国东部天山地区斑岩铜钼多金属矿进行了预测。B. M. LEE等^[4]利用航空Z轴倾子电磁测量(ZTEM)数据和大地电磁测深(MT)数据建立了加拿大不列颠哥伦比亚莫里森斑岩型铜金钼矿床的三维电阻率模型。Guo-qiang Xue等^[5]利用一个改进的大环瞬变电磁系统,发现了西藏超大型斑岩型钼矿床。A. K. Shah等^[6]

综合利用航磁激发极化、大地电磁和钻孔地质蚀变、磁化率、密度等数据,确定了铜金钼成矿远景。

金川铜镍硫化物矿床是世界三大镍铜铂族元素矿床之一,开采深度达到1 200 m左右,开展深部找矿对保证铜镍资源的供应具有重要意义。根据区域成矿机理与模式,矿区深部具有良好的成矿远景,例如:在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ矿段主要岩体、深部矿体还没有完全揭露的情况下,深部发现了新矿体^[7]。矿区西部岩体下盘围岩中具有形成硫化铜镍矿体的良好地质条件^[8]。矿区周边地区,岩体在空间上具有呈梯状排列特征,在主矿体附近发现了新的含矿岩体^[9]。王永才等^[10]对矿区地质、地球物理、地球化学等找矿标志进行了总结。通过重磁数据解释,认为东湾异常由埋深1 200 m以下的超基性岩引起,对深部探矿具有积极指示作用^[11]。通过对地质背景进行分析,结合岩石地球化学、高精度磁测或遥感等综合信息,对矿区南延区进行了找矿预测,并圈定了一些不同等级的找矿靶区^[12-13]。

本文在综合研究金川铜镍硫化物矿床成矿地质背景的基础上,分析找矿的地球物理标志,利用重磁

收稿日期:2020-06-12;修回日期:2020-07-17

基金项目:国家重点研发项目(2016YFC0600505)

作者简介:曾昭发(1966—),男,广西全州人,教授,博士生导师,博士,研究方向为应用地球物理;主持的重大项目有国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“兴蒙造山带构造叠合与大规模成矿作用”(2013CB429800)、国家科技攻关项目“深部矿产资源评价理论与方法”(2016—2020)、国家自然科学基金项目5项、国家“十二五”863计划重点项目“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,吉林省新能源重大专项“深部地热资源(含干热岩)勘查与开发利用”,吉林省地勘基金项目“长白山玄武岩覆盖区地热资源调查”等30项科研项目;获得的重大奖项有省部科技进步奖一等奖1项、二等奖3项;长春市西民主大街938号,吉林大学地球探测科学与技术学院,130026;E-mail: zengzf@jlu.edu.cn

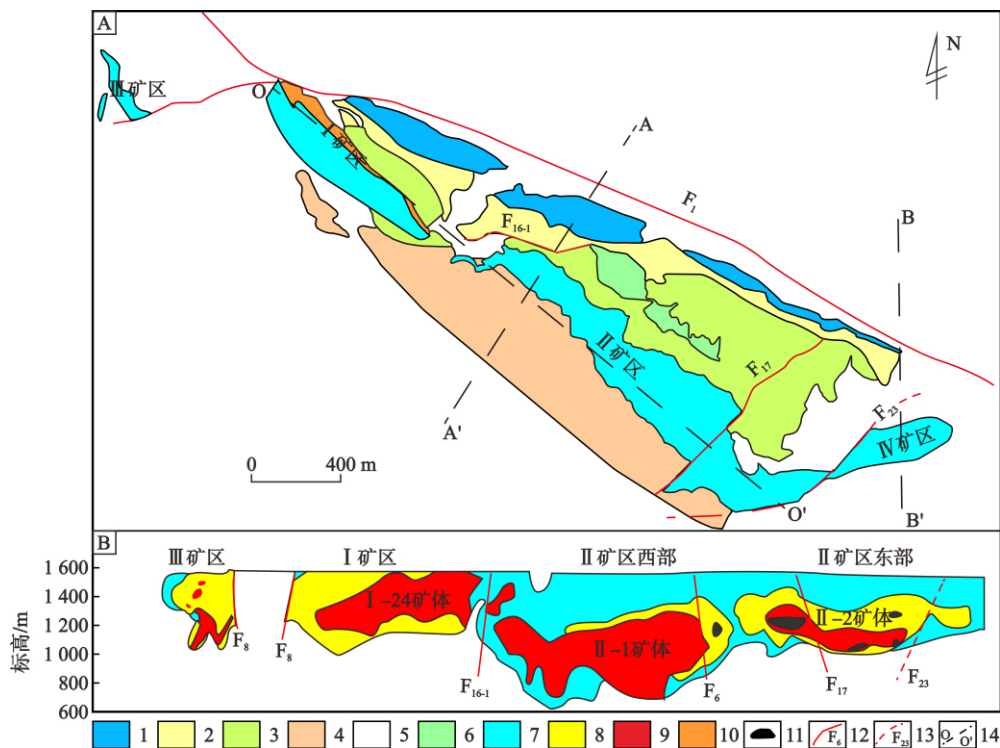
* 通信作者, E-mail: zjm16@mails.jlu.edu.cn, 18843199417

电等数据的处理结果对深部有利的成矿靶区进行预测,为区域深部找矿提供重要指导。

1 矿区地质特征与岩矿石物理性质

金川铜镍硫化物矿区位于龙首山隆起带中,含矿超基性岩体不整合侵入长城系白家嘴子组地层中,该地层岩性主要为片岩、片麻岩、大理岩、条带状混合岩等。已发现矿体与片麻岩、大理岩、条带状混合岩直接接触,呈岩墙产出,总体走向 50° ,倾向南西,倾角 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$,全长约 6 500 m,宽 10 ~ 500 m,出露面积约

1.34 km^2 。含矿超基性岩体被 F_8 、 F_{16-1} 、 F_{23} 断裂分为 4 段,自西向东依次对应 III、I、II、IV 矿区(见图 1)。III 矿区中西部第四系厚 10 ~ 40 m,向北增厚, F_8 断裂东南侧北东向凹槽中覆盖的第四系厚可达 180 m。I 矿区出露地层为龙首山群白家嘴子组和塔马子沟组,岩性以混合岩、片麻岩、片岩和大理岩为主。II 矿区出露地层主要为白家嘴子组和第四系,含矿超基性岩体以 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 沿断裂侵位。IV 矿区被第四系覆盖,下部发育白家嘴子组,由于多期岩浆的侵入作用,部分地层经历了不同程度的混合岩化作用。



1—角闪岩 2—片岩、片麻岩 3—大理岩 4—混合岩 5—第四系 6—石英正长岩 7—铁镁质—超镁铁质侵入岩
8—浸染状矿体 9—网状矿体 10—氧化矿体 11—块状矿体 12—已知断裂 13—推测断裂 14—剖面及编号

图 1 金川铜镍硫化物矿区地质图(A)、OO'测线剖面图(B)(据文献[14]修改)

按密度、磁性及电阻率等特征,矿区内岩矿石可分为 3 类:第 1 类是铜镍矿石,具有高密度、高磁性、低电阻率特征;第 2 类是超基性岩,具有高密度、高磁性、中等电阻率特征;第 3 类是超基性岩体的围岩,一般具有高电阻率、弱磁性或无磁性、密度普遍较低特征。

2 矿区重、磁、CSAMT 异常特征与深部矿体预测

2.1 航磁异常特征

矿区具有典型的航磁异常,异常幅度大,特征明显,与含矿超基性岩体密切相关,是重要的找矿标志^[15]。通过化极处理消除斜磁化的影响,航磁异常与目标地质体具有更加良好的对应关系(见图 2)。矿区高值正航磁异常呈北西向串珠状排列,且两侧等值线梯级带表现出北东陡、南西缓的特征,反映磁性

异常岩体向南西陡倾。航磁异常带北西侧异常带不连续的高值正航磁异常分别与已知 III、I、II、IV 矿区对应,且幅值较高,最大值超过 2 000 nT。

为获取更加丰富的航磁异常特征,对航磁数据进行了多尺度(一级到四级低频信号,频率逐渐降低,分离尺度逐渐增大)分离与制图(见图 3)。

由图 3 可知:随着分解尺度的增大,浅部高频信号的细节性信息逐渐减少。II 矿区正航磁异常范围逐渐增大,小尺度分量高值正航磁异常范围小,呈北西向展布,南北两侧正负航磁异常过渡处存在陡峭梯级带;大尺度分量高值正航磁异常范围大且呈现北东陡、南西宽缓的特征。北东侧的负航磁异常变化范围不大,且正负航磁异常过渡处陡峭梯级带仍然存在,反映北西向深大断裂的存在。依据矿区高值正航磁异常对可能含矿的超基性岩体的指示作用及多尺度

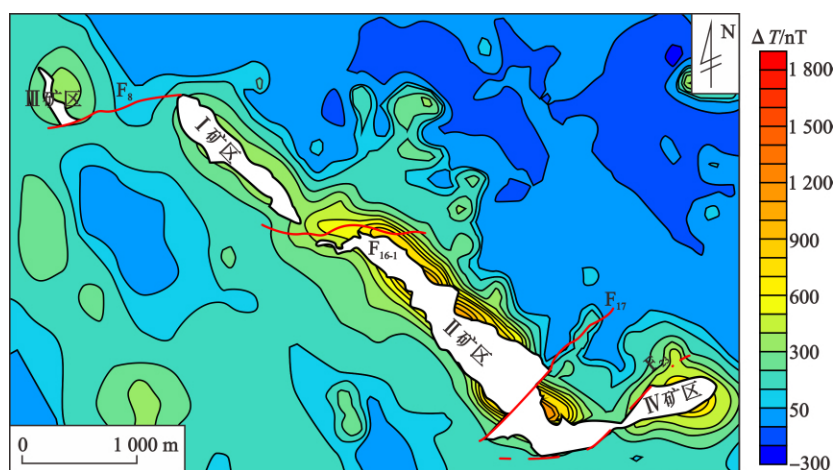
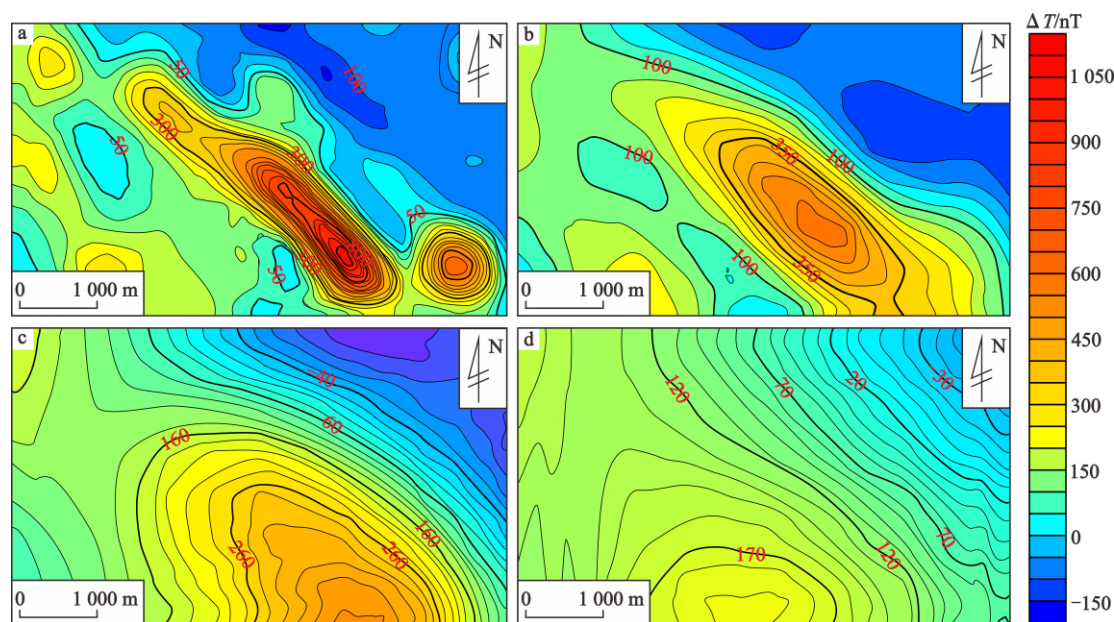


图2 金川铜镍硫化物矿区航磁化极异常图



a—一级低频信号 b—二级低频信号 c—三级低频信号 d—四级低频信号

图3 金川铜镍硫化物矿区航磁数据双树复小波多尺度分离

分离结果,推测深大断裂南西侧分布着规模较大的超基性岩体,具有良好的找矿前景。

2.2 综合重磁电数据反演与深部找矿预测

为开展典型异常的深部找矿研究,区域内共完成了6条剖面的反演与分析,本次选择2条剖面(AA'和BB')(见图1)解释重磁数据和可控源音频电磁(CSAMT)数据反演结果,并进行综合靶区分析。

2.2.1 剖面AA'

剖面AA'穿过II矿区,该矿区沿北西向出露的超镁铁质岩体位于 F_{16-1} 断裂以南及 F_{17} 断裂以北,长约2500 m,整体上宽度由西向东逐渐变大,宽度变化范围20~320 m,倾向南西,倾角较大($70^{\circ} \sim 80^{\circ}$),延深超过700 m。沿AA'剖面开展CSAMT测量和重力测量等地球物理工作。

剖面AA'航磁、重力、CSAMT反演剖面及靶区预测图见图4。视电阻率差异明显,高阻与低阻过渡界

线明显,形态复杂,与CSAMT电阻率二维反演结果对应,代表富矿体的红色区处于中低阻区且在下部,为高阻体与低阻体过渡位置(见图4-c),这符合矿体处于岩体下部的规律。利用SLO范数约束的方法获得航磁和重力反演结果(见图4-a、b)中的高磁性体和高密度体分布范围,与CSAMT电阻率二维反演结果中的中低阻范围及已知矿体所在位置对应较好,且均具有继续向左下延深的趋势,特别是重力异常的反演结果,其共反演出2个目标地质体,右侧上部重力异常与已知矿体具有非常良好的吻合关系,下部左侧重力异常深度较大(1400~1900 m),重磁电反演结果良好吻合,该位置是主要的深部找矿靶区。

结合矿区地质图、成矿规律及岩矿石物性参数,对已知矿体深部及边部有利的赋矿位置进行分析,认为已知矿体左下方深部不同物性过渡区域的舒缓处,

即断裂倾角较小的位置,是深部找矿的有利部位。推测具体位置为剖面 AA' 400 ~ 1 000 m、标高 200 ~ 400 m 处(见图 4-c)中黑色虚线范围)。该位置低阻异常

对应位置也表现出了高磁、高重力异常特征。因此,认为该中低阻区亦具有较大赋存超基性岩体及矿体的可能性,该位置为重要的找矿靶区。

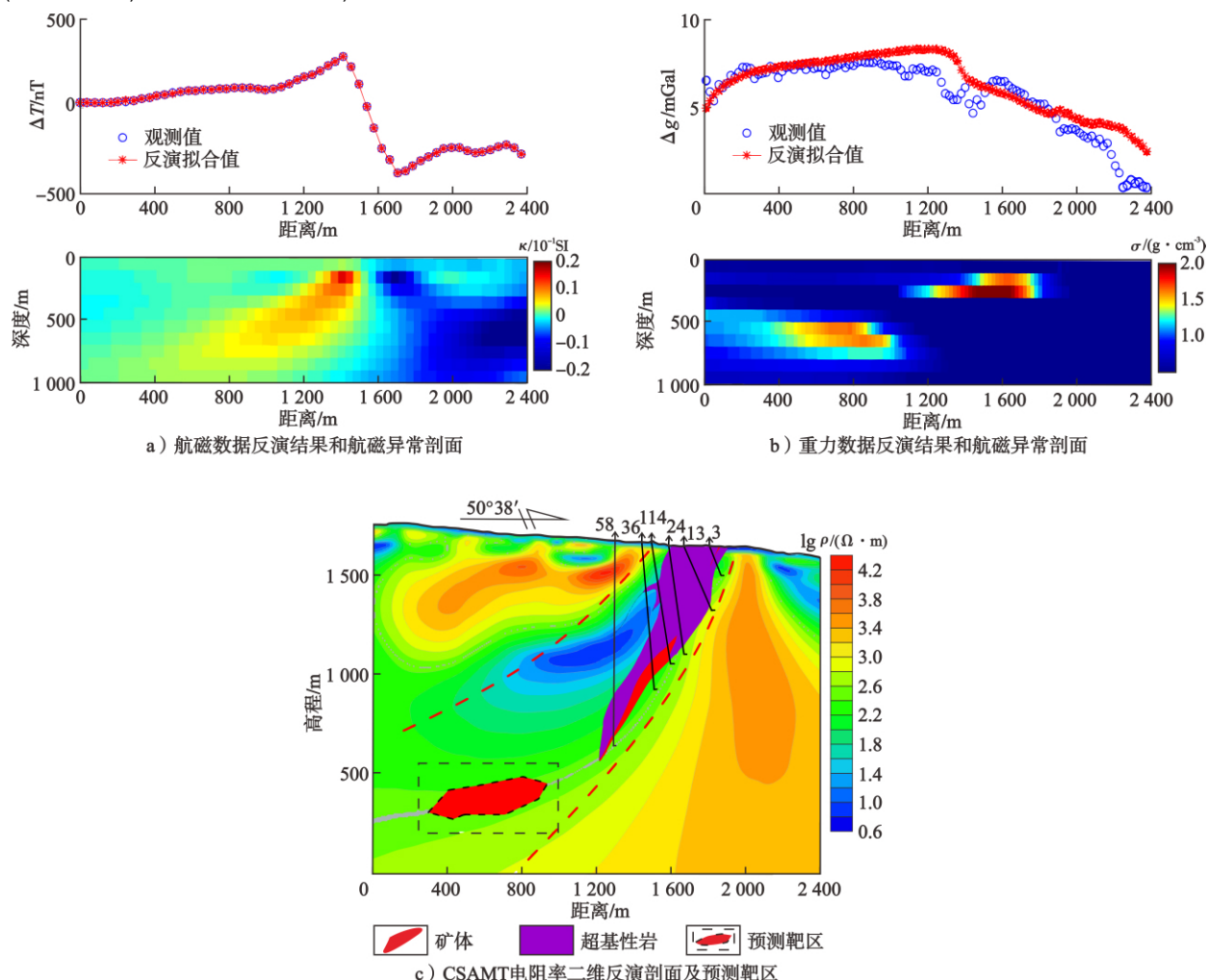


图4 金川铜镍硫化物矿区 AA'剖面航磁、重力、CSAMT 反演剖面及靶区预测图

2.2.2 剖面 BB'

剖面 BB'穿过IV矿区,IV矿区已知超镁铁质岩体长 1 160 m,被第四系完全覆盖,覆盖层厚度 60 ~ 140 m,覆盖层以下发育白家嘴子组及含矿超基性岩体。矿体以低品位矿石为主,①号矿体为主矿体,产于含矿超基性岩体底板下凹地段,呈透镜状,上部与下部小,中间大。剖面 AA'穿过①号矿体,靠近 10 号勘探线,沿此剖面进一步开展重力和 CSAMT 工作,有利于进一步探获矿体。

剖面 BB'航磁、重力、CSAMT 反演剖面及靶区预测见图 5。剖面中下部相应位置具有明显的大范围高磁、高密度异常区,均具有向左上方延伸的特征(见图 5-a)、b)。CSAMT 电阻率二维反演结果表明,剖面中部的电阻率相对较低,右侧的电阻率相对较高,过渡带向深部由陡变缓(见图 5-c)。与航磁和重力的反演结果相比,发现高密度、高磁、中低电阻率区与中低电阻率区一致。综合矿区地质图、

附近地质勘探线剖面及岩矿石物性参数对反演结果进行解释,认为本区浅层低密度、低磁、低阻区主要为第四系,而右侧高阻区为白家嘴子组的反映,高密度、高磁及接触带上部的中低阻异常对应 IV 矿区已知的含矿超基性岩。此外,推测右侧不同电阻率过渡带为断裂,是超基性岩浆侵入白家嘴子组的通道。根据物探模型和成矿规律,推测深部高密度、高磁、中低阻异常区是有利的找矿靶区,位置大致在剖面 BB' 2 400 ~ 3 100 m、埋深 1 200 ~ 1 700 m 处(见图 5-c)。

3 结 论

地球物理方法是深部金属矿产勘查的重要支撑技术,以金川铜镍硫化物矿床为研究对象,采用航磁、重力、CSAMT 等方法进行深部勘查,反演结果所显示的高磁、高密度、中低阻区与浅部已知含矿岩体对应较好,也显示了深部有利的成矿位置,并在深部圈定了有利找矿靶区。采用多种地球物理方法研究金川

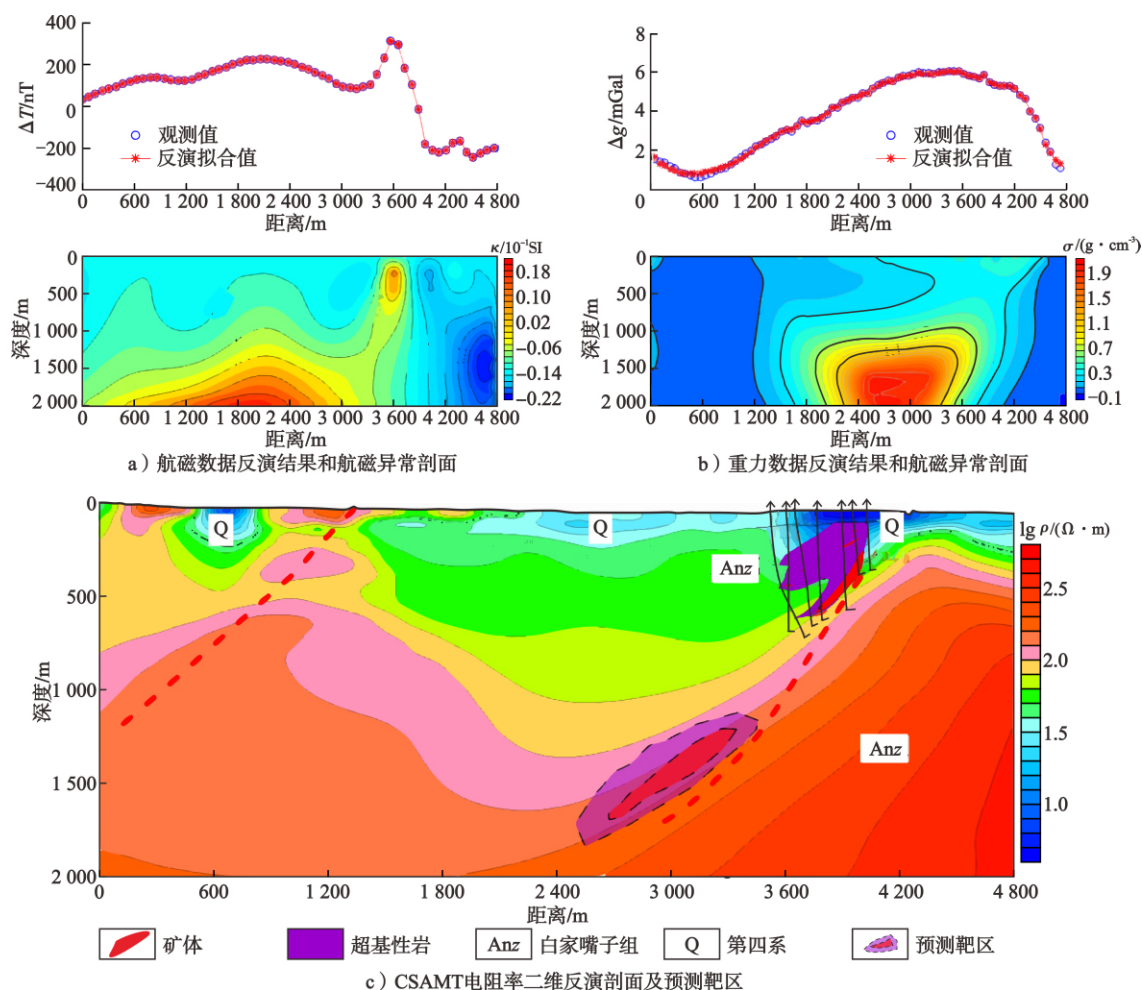


图5 金川铜镍硫化物矿区BB'剖面航磁、重力、CSAMT反演剖面及靶区预测图

铜镍硫化物矿床深部的找矿潜力具有重要意义,为矿区及周边地区进一步深部探矿提供了良好的参考,同时也很好地证明了利用地球物理方法探测深部金属矿山的可行性和有效性。根据这些工作,获得如下结论:

1) 金川铜镍硫化物矿床矿体与超基性岩体紧密相关,地球物理找矿标志明显,表现为中低阻、高磁和高密度特征,为深部找矿提供了重要指导。

2) 利用剖面的二维重磁反演结果及可控源音频电磁数据反演结果,结合区域地质条件进行综合分析,确定成矿目标地质体,为钻探提供重要指导。

3) 高精度剖面测量数据的反演具有重要作用,特别是对脉状矿体的预测,二维剖面反演算法可靠、反演稳定,具有良好的推广应用潜力。

[参考文献]

- [1] HILDENBRAND T G, BERGER B, JACHENS R C, et al. Regional crustal structures and their relationship to the distribution of ore deposits in the western United States based on magnetic and gravity data[J]. *Economic Geology*, 2000, 95(8): 1583–1603.
- [2] KHEYROLLAHI H, ALINIA F, GHODS A. Regional magnetic lithologies and structures as controls on porphyry copper deposits: evidence from Iran[J]. *Exploration Geophysics*, 2016, 49(1): 98–

110.

- [3] XIAO F, WANG Z H. Geological interpretation of Bouguer gravity and aeromagnetic data from the Gobi-desert covered area, Eastern Tianshan, China: implications for porphyry Cu–Mo polymetallic deposits exploration[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80: 1042–1055.
- [4] LEE B M, UNSWORTH M J, HUBERT J, et al. 3D joint inversion of magnetotelluric and airborne tipper data: a case study from the Morrison porphyry Cu–Au–Mo deposit, British Columbia, Canada[J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(2): 397–421.
- [5] XUE G Q, QIN K Z, LI X, et al. Discovery of a large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet through a modified TEM exploration method[J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2012, 17(1): 19–25.
- [6] SHAH A K, BEDROSIAN P A, ANDERSON E D, et al. Integrated geophysical imaging of a concealed mineral deposit: a case study of the world-class Pebble porphyry deposit in southwestern Alaska[J]. *Geophysics*, 2013, 78: B317–B328.
- [7] 高亚林. 金川矿区地质特征、时空演化及深部找矿研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [8] 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛. 中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2018, 54(2): 221–235.
- [9] 魏铮. 甘肃金川铜镍矿床58号矿体成因及成矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [10] 王永才, 焦建刚, 闫海卿. 金川铜镍硫化物矿床找矿指标体系探

- 讨[J]. 矿床地质 2010 29(增刊 1): 895 – 896.
- [11] 张翔, 赵晓平, 谢志峰. 重磁方法在金川铜镍矿东延 M-5 异常勘查中的应用[J]. 物探与化探 2010 34(2): 139 – 143.
- [12] 彭桥梁, 曾南石, 李天虎, 等. 金川南延地区地质特征及找矿远景分析[J]. 金属矿山 2012(10): 97 – 100.
- [13] 文美兰, 罗先熔, 曾南石, 等. 金川铜镍矿床深部多元地学信息勘查技术综合找矿研究[M]. 北京: 地质出版社 2013.
- [14] MAO X C, LI L J, LIU Z K et al. Multiple magma conduits Model of the Jinchuan Ni – Cu – (PGE) Deposit ,Northwestern China: constraints from the geochemistry of platinum-group elements [J]. Minerals 2019 9(3): 187.
- [15] 张林, 宋小超, 贾嵩, 等. 金川矿区深部物探资料综合整理与勘查技术应用研究[R]. 北京: 中色地科矿产勘查股份有限公司 2017.

Comprehensive geophysical responses and comprehensive prediction method for deep metal deposit —A case study of Jinchuan super-large Cu – Ni sulfide deposit

Zeng Zhaofa, Zhou Ningyuan, Zhang Jianmin, Huo Zhijun, Gong Mingxu
(College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University)

Abstract: Deep metal deposit prospecting is an important direction of resource exploration at present, and the geophysical method is one of the most effective methods for deep metal deposit prospecting with deep reach and high resolution. In the case study of Jinchuan Cu – Ni sulfide deposit, on the basis of comprehensive analysis of geological setting and petrophysical properties, the aeromagnetic data are separated in a multiscale way, and the deep part of the southwest part of I, II, III, VI districts is determined to have a good prospecting prospect. The data inversion results of aeromagnetic, gravity and controlled source audio frequency magnetotelluric sounding (CSAMT) survey profiles are comprehensively used to analyze the abnormal features of each method and the geophysical marks of typical ore bodies, the medium – low resistivity, high density and high magnetic anomalous area near the tectonic belt are revealed to be favorable spots for ore prospecting based on the distribution of known typical rock ore bodies. The target area of deep prospecting has been determined on the basis of the characteristics and the target area is estimated to be more than 1 000 meters deep. The study provides important basis for drilling.

Keywords: Jinchuan Cu – Ni sulfide deposit; deep prospecting; geophysics; CSAMT; gravity and magnetic method; joint inversion